

TITLUL TEZEI

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Științe Inginerești : Ingineria Sistemelor

autor Ing. Ovidiu Gana

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean

Teza de doctorat cu titlul „Probleme de modelare și conducere ale sistemelor electroenergetice solare” prezintă o sinteză a rezultatelor cercetărilor autorului, interpretate pe parcursul activității desfășurate în cadrul Departamentului de Automatică și Informatică Aplicată al Facultății de Automatică și Calculatoare din cadrul Universității „Politehnică” Timișoara, în vederea obținerii titlului de doctor în domeniul „Ingineria Sistemelor”. Cercetarea a fost efectuată în vederea creșterii randamentului sistemelor electroenergetice care au în compoziția lor panouri fotovoltaice. Teza este structurată în 7 capitole, având 143 pagini, și o listă de 156 titluri bibliografice din care 11 aparțin autorului.

În primul capitol se prezintă oportunitatea preocupărilor abordate și principalele obiective ale lucrării.

Oportunitatea rezultă din preocupările actuale pe scară largă privind resursele regenerabile solare în scopul obținerii de energie electrică denumită și „verde”. Dezvoltarea sistemelor electroenergetice solare a fost posibilă pe de o parte ca urmare a salturilor tehnologice în domeniul electronicii, electronicii de putere, a materialelor, a noilor descoperiri în fizică, a evoluției sistemelor și strategiilor de conducere, iar pe de altă parte a politicilor europene, naționale și zonale de atragere a energiilor regenerabile în obținerea de energie electrică.

În sistemele energetice actuale mondiale, producerea energiei electrice din resurse regenerabile este de mare interes, mai ales că pe de o parte rezervele mondiale de combustibili clasici: petrol, carbune, gaze, sunt pe cale de epuizare datorită consumului din ce în ce mai mare (se dublează din 10 în 10 ani) iar pe de altă parte preocupările legate de protecția mediului au devenit o prioritate mondială.

În România, având în vedere potențialul solar, oportunitatea lucrării este pe deplin justificată din punct de vedere economic, tehnic și în special ecologic.

Obiectivul de bază al lucrării constă în conceperea și analiza funcțională a unui sistem de conducere astfel încât energia solară captată să fie maximă. Se consideră în acest sens o putere radiantă solară variabilă în timp în funcție de condițiile meteo. Prin urmare valoarea puterii electrice debitate de panoul fotovoltaic (PV) trebuie să fie în strânsă corelare cu valoarea puterii radiante solare, pentru a se putea realiza o funcționare în punctele de putere maximă.

În acest sens principalele obiective propuse în lucrarea de față sunt:

- Dezvoltarea, identificarea și validarea unor modele matematice pentru panourile fotovoltaice utilizate în conducerea SPV.
- Dezvoltarea unor structuri de conducere în vederea obținerii de energie electrică maximă (urmărirea punctului de putere maximă) în condiții meteo variabile în timp.

Capitolul doi este consacrat analizei critice a sistemelor electroenergetice solare existente, prezentate în literatura de specialitate, conturându-se stadiul actual al cercetărilor privind conversia energiei solare precum și perspectivele utilizării ei atât pe plan național cât și pe plan internațional. Capitolul detaliază principalele tipuri de surse de energie regenerabile și neregenerabile folosite pe plan mondial specificând avantajele și dezavantajele fiecărui tip de energie în parte. Pentru energia solară se concluzionează că aceasta este cea mai potrivită pentru majoritatea comunităților izolate care în prezent sunt alimentate cu energie electrică produsă de generatoare diesel, deloc avantajoase datorită consumului și accesului limitat la carburant și a nivelului de poluare crescut. Consumul energiei electrice este mult mai mare după lasarea serii, când sursa de energie solară dispăre, sau pe timpul zilei datorită fluctuațiilor de putere cauzate de factorii meteo, ceea ce face necesar să fie implementate sisteme de stocare a energiei, care trebuie să preia fluctuațiile de putere ce apar datorită variațiilor nivelului de radiații solare și în timpul zilei și să poată oferi consumatorilor energia necesară la valorile și momentele de timp impuse de aceștia, iar astfel, sistemele electroenergetice cu panouri fotovoltaice pot să ofere o soluție completă la o funcționare insulară.

Sistemele de stocare trebuie să preia fluctuațiile de putere ce apar datorită variațiilor nivelului de radiații solare. Se transferă astfel, în sistemul electroenergetic național, o putere constantă pe un anumit interval de timp, fapt deosebit de important în ceea ce privește stabilitatea dinamică a sistemului electroenergetic național. Preluarea surplusului de putere de la panourile fotovoltaice în acumulatorii electrice se realizează până la atingerea unei stări de încărcare de 100%, stare estimată prin valoarea tensiunii la bornele acumulatorului electric sau a bateriei de acumulatori. Transferul de putere din acumulatorul electric în rețea se face prin intermediul unui convertor DC-AC. Tensiunea la acesteia este în jurul tensiunii nominale (de 12,24,...[V], (multiplii de 12 [V])). Preluarea surplusului de putere de la panoul fotovoltaic în supercondensatoare se face prin încărcarea succesivă a acestora la tensiunea care alimentează convertorul DC-AC. Transferul de putere de la supercondensatoare în rețea se face de asemenea printr-un convertor DC-AC, cu precizarea că în cazul supercondensatoarelor transferul se efectuează într-un timp mult mai scurt. În acest mod acumulatorul electric și supercondensatorul funcționează în mod separat. Supercondensatoarele se folosesc la puteri relativ mici. La puteri de ordinul MW folosirea supercondensatoarelor nu se justifică și deci sistemul de stocare conține numai acumulatorii electrice. Sistemele electroenergetice solare oferă o soluție de mare perspectivă în asigurarea necesarului de energie electrică mereu ascendent. Desigur, implementarea acestor sisteme bazate pe energii regenerabile trebuie să aibă la bază studii aprofundate și de lungă durată privind radiația solară.

Sistemele electroenergetice cu panouri fotovoltaice, denumite și sisteme fotovoltaice, furnizează o putere ce se modifică lent în timp, depinzând direct de puterea radiantă solară care se modifică la schimbarea condițiilor meteo (nori, praf, nebulozitate). Energia anuală primită de la soare este cu mult mai mare decât energia globală consumată de populație iar acest aspect a făcut această sursă de energie deosebit de atractivă.

Deasemenea acest capitol prezintă detaliat stadiul actual al sistemelor de conversie a energiei, prezentând avantajele și dezavantajele utilizării acestui tip de energie și efectul conversiei energiei din energie solară în energie electrică prin efectul fotovoltaic.

Capitolul trei tratează problematica modelării matematice a panourilor fotovoltaice ca principale componente ale sistemelor electroenergetice solare.

Conducerea sistemelor energetice solare, astfel încât funcționarea să fie în zona optimă – energie maxim captată – impune folosirea unor modele matematice adecvate, modele care să permită în fiecare moment identificarea punctului de putere maximă cu ușurință. Astfel este dezvoltat un model matematic pentru panoul fotovoltaic original bazat pe funcția “cosinus”, construit prin nenumarate încercări experimentale care în final s-au concluzionat cu un model care se mulează perfect peste caracteristica externă a oricărui panou fotovoltaic prin simpla ajustare a unor parametri.

Dezvoltarea acestui model matematic s-a efectuat analizând caracteristicile externe experimentale și pornind de la ideea că forma caracteristicii externe experimentale se apropie de forma funcției cosinus pe intervalul $[0 - \pi/2]$, și ținând cont că valorile curenților la scurtcircuit cresc cu puterea radiantă solară iar valorile tensiunilor de la funcționarea în gol nu depind de valoarea puterii radiante și se micșorează cu creșterea temperaturii a panoului fotovoltaic, iar temperatura panoului fotovoltaic influențează valoarea curentului de scurtcircuit, în sensul că acesta crește direct proporțional cu temperatura au dus la definitivarea acestui model matematic.

Acest model permite conducerea optimă a sistemelor energetice solare prin determinarea coordonatelor punctelor de putere maximă. Sunt propuse deasemenea două modele matematice simplificate utilizate considerând temperatura constantă, pentru situațiile în care nu este necesar un model mai complex și care pot fi implementate într-un sistem fizic foarte ușor fără a ridica probleme legate de puterea de calcul a controlerului. Aceste modele au fost concepute astfel încât să urmărească cât mai fidel caracteristica externă a panoului fotovoltaic prin identificarea unor parametri definitorii. Determinarea coordonatelor punctelor de putere electrică maximă s-a realizat pentru situația în care nivelul puterii radiante solare (insolație) este constant, cât și în cazul apropiat de realitatea meteo în care nivelul puterii radiante solare este variabil și dependent de condițiile meteo. Pentru acest caz a fost considerată o variație sinusoidală a nivelului de insolație, variație care simulează foarte bine modificările datorate factorilor realității meteo.

În cadrul capitolului patru se analizează funcționarea sistemului cu panouri fotovoltaice considerându-se câteva configurații specifice, disponibile în majoritatea sistemelor fizice de pe piață, urmărindu-se randamentul de conversie al fiecărei configurații în parte. Configurația în care panoul fotovoltaic debitează pe o rezistență de sarcină constantă este relevantă deoarece este prezentă în majoritatea microsistemelor individuale cu o utilizare preponderentă în cadrul sistemelor de iluminat al tunelurilor, configurația în care panoul fotovoltaic debitează direct pe un acumulator electric fiind relevantă deoarece este utilizată pe scară largă în sistemele de iluminat de urgență. Această configurație este tratată separat considerând atât cazul în care sarcina este neadaptată respectiv cazul în care sarcina este adaptată la caracteristica externă a panoului fotovoltaic.

O altă configurație tratată, considerată unica soluție de adaptare a mărimilor furnizate de parcul de panouri fotovoltaice la unitatea de stocare sau de distribuție a energiei, utilizată în toate sistemele de puteri mari, este cea în care panoul fotovoltaic debitează pe un convertor electric (DC-DC) iar apoi debitează pe o baterie de acumulatori electrici care necesită un alt nivel de tensiune și de curent față de cele furnizate de parcul de panouri.

Este efectuată o analiză comparativă a sistemului în care panoul debitează pe un convertor (DC-DC) la modificarea sarcinii, utilizând metoda clasică din literatura de specialitate, și anume metoda micilor perturbații, respectiv metoda dezvoltată în teză, denumită metoda anulării derivatei puterii care utilizează un panou fotovoltaic de mici dimensiuni pentru a găsi coordonatele punctului de putere maximă, iar apoi folosește aceste

valori pentru a comanda întreg parcul de panouri fotovoltaice, prin ajustarea optimă a parametrilor convertorului (DC-DC) . Rezultatele analizei demonstrează că metoda clasică a micilor perturbații modifică rezistența de sarcină echivalentă de la bornele panoului fotovoltaic și urmărește ca funcționarea sistemului electroenergetic solar să fie cât mai aproape de punctul de putere maximă, dar acest punct nefiind cunoscut, se realizează o funcționare în permanență la o putere sub cea maximă. Pentru o funcționare în punctele de putere maximă, caracterizate prin valorile tensiunii optime și a curentului optim, este necesară folosirea unui algoritm de conducere care cunoaște punctele de putere maximă și poate asigura un reglaj optim al convertorului (DC-DC) , și anume algoritmul care are în componența sa metoda anulării derivatei puterii. Se analizează deasemenea comportarea sistemului fotovoltaic la modificarea rezistenței de sarcină în funcție de diferența de putere pentru diferite valori ale parametrilor algoritmului de conducere. Este conceput un algoritm de conducere optimal pentru a duce sistemul în zona energetică maximă în care se utilizează metoda anulării derivatei puterii. S-au determinat și analizat variațiile mărimilor semnificative ale sistemului fotovoltaic prin adaptarea rezistenței de sarcină la valoarea puterii debitate astfel încât acesta să se apropie de punctele de putere maximă. S-au considerat și analizat sisteme de conducere bazate pe metoda anulării derivatei puterii, considerând ca mărimi de referință curentul optim și tensiunea optimă, respectiv doar curentul optim.

Capitolul cinci este dedicat prezentării standului realizat, destinat identificării matematice a modelelor matematice propuse, analizei funcționării optime a panoului fotovoltaic, respectiv validării rezultatelor, având în componență o arie de cinci panouri fotovoltaice conectate la un modul convertor DC-DC care are ca sarcină un reostat inteligent și un panou fotovoltaic conectat la un controler, cu rolul de a trasa caracteristica externă a tipului de panou pentru situația meteo din acel moment în vederea conducerii optime a panourilor aflate în circuitul de forță. Este proiectat și realizat un controler care are la baza un microcontroller care permite prelucrarea și procesarea în timp real a datelor achiziționate de la panoul fotovoltaic și de la senzorul de temperatură, pentru a comanda convertorul DC-DC astfel încât acesta să poată furniza la ieșire un maxim de putere (funcționare în punctele de putere maximă). Reostatul inteligent realizat este un reostat de putere folosit drept consumator. Acesta este comandat de un motor pas cu pas care la randul lui este comandat de o structură cu microcontroller ,display și panou cu butoane, pentru a se putea modifica rezistența acestui reostat prin modificarea unor parametrii software sau prin alegerea unor forme de variație a rezistenței în cazul considerării unei caracteristici date. Acest reostat a fost deosebit de util în perioada de cercetare deoarece a putut simula diferite stări de încărcare a unui acumulator electric, simularea a unor sarcini de puteri diferite în vederea analizei răspunsului sistemului. Pe lângă acest reostat standul a fost dotat cu diferiți consumatori capacitivi, inductivi și rezistivi cu valori fixe, iar conectarea acestora în circuit a fost făcută prin intermediul unor circuite cu relee comandate de către un PC folosind portul serial al acestuia pentru a putea analiza cât mai multe scenarii în timp scurt (pentru a avea același punct de putere maximă al panoului fotovoltaic și a nu fi influențate măsurătorile factorii meteo).

În capitolul șase sunt prezentate o parte a măsurătorilor efectuate pe stand, considerate semnificative. Au fost realizate analize comparative pentru două scenarii distincte: analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți, precum și a rezultatelor obținute utilizând valori fixe și distincte pentru rezistența de sarcină pentru cazul utilizării unui algoritm de conducere clasic (metoda micilor perturbații) și pentru algoritmul original dezvoltat prin utilizarea unei scheme care presupune doar panoul fotovoltaic care debitează

direct pe o rezistență de sarcină și prin considerarea a patru valori fixe, distincte ale rezistenței de sarcină, în jurul punctului de putere maximă pentru a se urmări determinarea poziției punctului de funcționare în comparație cu acest punct de putere maximă, demonstrându-se astfel că la o alegere potrivită a valorii rezistenței de sarcină se pot obține aproximativ aceleași performanțe, nemaifiind necesară electronica de putere (convertorul DC-DC) în cazul în care sistemul permite adaptarea acestor marimi (în cazul sistemelor de mici dimensiuni). Analiza a demonstrat că prin utilizarea metodei anulării derivatei puterii și prin cunoașterea coordonatelor punctului de putere maximă (curentul optim și tensiunea optimă) s-a putut capta maximul de putere la un nivel de insolație dat. Din punct de vedere energetic s-a realizat un surplus de energie, în varianta propusă, de aproximativ 10% a energiei electrice obținute din conversia fotovoltaică raportată la energia obținută prin utilizarea metodei micilor perturbații , prin intermediul căreia nu se pot cunoaște coordonatele punctelor de putere maximă. Deasemenea au fost determinate experimental caracteristicile externe ale panoului fotovoltaic și s-a efectuat o identificare experimentală a modelului matematic al panoului fotovoltaic, considerand o temperatură constantă. În capitolul final al lucrării (Capitolul 7), sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile personale și posibilele direcții de cercetare ulterioară care pot fi axate pe dezvoltarea de noi modele pentru alte tipuri constructive de panouri, de noi variante ale strategiilor de conducere optimală și deasemenea pot fi extinse performanțele controlerului dezvoltat prin implementarea unor funcții suplimentare pentru a informa utilizatorul de eventualele avarii sau perioade de mentenanță a parcului de panouri. Deasemenea pot fi înregistrați parametrii de funcționare ai controlerului pentru a fi utilizați în scop statistic sau se pot crea interfețe de comunicație cu alte controlere existente pe piață.

Bibliografie

1. Awang J., Rozana A., „Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation”, Solar Energy, Volume 148, 15 May 2017, Pages 128-139.
2. Ahmed M. Atallah, Almoataz Y. Abdelaziz, and Raihan S.Jumaah, ”Implementation of perturb and observe MMPT of PV system with direct control method using BUCK and BUCKBOOST converters”, Department of Electrical power & Machine, Faculty of Engineering, Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal(EEIEJ), Vol. 1, No. 1, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 31 Feb 2014
3. Bennet M., Mikofski M., “Accurate Modeling of Partially Shaded PV Arrays”,44th Photovoltaic Specialist Conference(PVSC),Washington DC, USA, IEEE, 25-30 Iunie 2017, Article ID: INSPEC-18189000
4. Biraja P., Nayak A., “Design of MPPT controllers and PV cells using MATLAB Simulink and their analysis”, International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Navi Mumbai, India,IEEE, 27-28 Jan. 2017, Article ID:INSPEC-16963599
5. Dave F., “Introduction to Photovoltaic Systems Maximum Power Point Tracking”, Texas Instruments,2010, Report number: 446.2010
6. Dragomir T., Petcuț F., Dragomir L., “Maximum Power Point Determination for a Photovoltaic Panel using a Simulink Model”, 4th International Workshop on Soft Computing Applications, 15-17 July, Arad, Romania, 2010, p221-224.
7. Gana O., Prostean O., Vasar C., Babescu M., "Modeling and Optimized Control of Photovoltaic Energy Conversion Systems", International Conference SACI, Timisoara, 2012

8. Gana O., Babescu M., "Photovoltaic panels modeling and determination of the maximum power point (MPP)", ICAS, Hunedoara, 9-11 mai, 2019
9. Kerekes T., Sera D., Teodorescu R., "Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface", Institute of Energy Technology, 2014
10. Mahima Sunar, C. Nithya, J. Preetha Roselyn, "Study of intelligent MPPT controllers for a grid connected PV system", International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Srivilliputhur, India, Article ID: INSPEC 17613730, 23-25 Martie 2017, ©2017 IEEE
11. Mamatha G., "Perturb and Observe MPPT Alogrithm Implementation for PV Applications", International Journal of Computer Science and Information Technologies, 2015, Article ID: 6(2):1884-1887
12. Mircea Taciuc, "PV cells I-V characteristic. Explicit equation with three parameters and its simplified forms", 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, Article ID: INSPEC 16836147, 23-25 Martie 2017, ©2017 IEEE
13. Mohammed A., "A way to improve maximum power point (MPP) tracking for PV systems", Department of Electrical Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh, India, 2017
14. Navjeet S., Mala D., Kamakshi S., "Analysis of a PV system under partially shaded condition using enhanced PV model", 7th International Conference on Power Systems (ICPS), Pune, India, Article ID: INSPEC 17858030, 21-23 Decembrie 2017, ©2017 IEEE
15. Neamen A., "Semiconductor Physics and Devices", New York, 2003
16. Osamede A., Ruaan S., Christo P., "Simulation and analysis of maximum power point tracking in a stand alone PV system: A case study using regression analysis and pulse width modulation", International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Cape Town, South Africa, Article ID: INSPEC 16902204, 4-5 Aprilie 2017 ©2017 IEEE
17. Pakkiraiah B., Sukumar G., "Research Survey on Various MPPT Performance Issues to Improve the Solar PV System Efficiency", Hindawi Publishing Corporation Journal of Solar Energy, 2016, Article ID: 8012432
18. Paththayame U., Lili H., "A Simplified Mathematical Model for PV Cell Simulation", 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Waikoloa Village, HI, USA, Article ID: INSPEC 18288222, 10-15 Iunie 2018, ©2018 IEEE
19. Prostean O., "Tehnici de identificare si modelare", 1985, Lito IPTVT,
20. Ricardo Moreno, "Detailed modelling and simulation of photovoltaic systems", Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), Bogota, Colombia, Article ID: INSPEC 17042568, 31 May - 2 Iunie 2017 ©2017 IEEE
21. Rokonzaman M., Mahmuda K., Hossam H., Shamimul I., "Design of a MPPT Solar Charge Controller in Matlab Simulink GUI Environment", International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS), 22-23 Feb. 2017, MIST, Dhaka
22. Tahiri F., Chikh K., Khafallah M., "Modeling and performance analysis of a solar PV power system under irradiation and load variations", 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Marrakech, Morocco, Article ID: INSPEC 17415479, Electronic ISSN: 2474-0446, 28-31 Martie 2017, ©2017 IEEE